



# Éclatement des bandes de gain paramétrique dans une fibre à dispersion oscillante

Christophe Finot, Fang Feng, Philippe Morin, Yanne Chembo, Stefan Wabnitz

## ► To cite this version:

Christophe Finot, Fang Feng, Philippe Morin, Yanne Chembo, Stefan Wabnitz. Éclatement des bandes de gain paramétrique dans une fibre à dispersion oscillante. 34ièmes Journées Nationales d'Optique Guidée, Oct 2014, Nice, France. pp.195-197. hal-01066481

**HAL Id: hal-01066481**

**<https://hal.science/hal-01066481>**

Submitted on 31 Oct 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ÉCLATEMENT DES BANDES DE GAIN PARAMÉTRIQUE DANS UNE FIBRE À DISPERSION OSCILLANTE

Christophe Finot <sup>1,\*</sup>, Fang Feng <sup>1</sup>, Philippe Morin <sup>1</sup>, Yanne K. Chembo <sup>2</sup> et Stefan Wabnitz <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, Dijon, France

<sup>2</sup> FEMTO-ST/Département d'Optique, Besançon, France

<sup>3</sup> Department of Information Engineering, Université de Brescia, Brescia, Italie

[christophe.finot@u-bourgogne.fr](mailto:christophe.finot@u-bourgogne.fr)

## RÉSUMÉ

Nous analysons numériquement le spectre d'instabilité modulationnelle dans une fibre à dispersion oscillante en fonction de l'amplitude des fluctuations de dispersion. Pour une forte oscillation de la dispersion, nous observons la division de la bande de gain en deux sous bandes.

**MOTS-CLEFS :** *Instabilité de modulation ; Fibres optiques à dispersion oscillante ; optique non-linéaire fibrée.*

## 1. INTRODUCTION

L'instabilité de modulation (IM) est un processus non-linéaire qui a été étudié dans un grand nombre de domaines de la physique, comme les plasmas, l'hydrodynamique ou l'optique. L'IM conduit à l'émergence et à l'amplification de bandes de gain dans le spectre. Différentes démonstrations expérimentales ont été menées dans des fibres optiques à dispersion anormale, dans des fibres à dispersion normale avec un terme dispersif d'ordre 4 et dans des fibres présentant une biréfringence ou bien un couplage multimode. Plus récemment, l'intérêt théorique et expérimental des processus d'IM a été ravivé par l'utilisation de fibres présentant une modulation périodique de leur profil longitudinal de dispersion [1]. En effet, grâce à la résonance paramétrique introduite par cette variation contrôlée, des bandes d'instabilité scalaire peuvent émerger, et cela même dans le régime de dispersion normale d'une fibre à dispersion oscillante (DOF) [2]. De récentes expériences ont confirmé ce nouveau type d'IM dans des fibres DOF microstructurées autour de 1  $\mu\text{m}$  [1], ainsi que dans des fibres non-microstructurées, hautement non-linéaires optimisées aux longueurs d'onde des télécommunications optiques [3].

A ce stade, l'impact de l'amplitude des fluctuations de la dispersion n'a pas encore été discuté précisément. Dans cette contribution, nous présentons une étude systématique des différentes bandes qui sont numériquement observées en sortie de la DOF. Cette étude révèle l'émergence de nouvelles structures et leur séparation en deux sous-bandes. Nous proposons une explication qualitative restant notamment en accord avec les règles analytiques proposées en [1].

## 2. CONFIGURATION ÉTUDIÉE

Nous considérons numériquement l'évolution d'une onde continue d'une puissance moyenne de 0.75 W dans une fibre optique présentant une variation périodique longitudinale de sa dispersion. L'évolution du champ optique est alors décrite par l'équation de Schrödinger non-linéaire qui inclue à la fois la non-linéarité Kerr de la silice  $\gamma$  et la dispersion  $\beta_2$  qui varie suivant la distance  $z$  selon l'expression  $\beta_2(z) = \beta_{2av} + \beta_{2amp} \sin(2\pi z/\Lambda)$ , avec  $\beta_{2av}$ ,  $\beta_{2amp}$  et  $\Lambda$  étant respectivement la dispersion moyenne, l'amplitude des variations de dispersion et leur période spatiale. La fibre étudiée a pour paramètres  $\gamma = 2 \text{ /W/km}$ ,  $\Lambda = 1 \text{ km}$  et  $\beta_{2av} = -0.5 \text{ ps/km/nm}$ .

Dans cette situation, l'IM conduit à l'émergence de bandes de quasi-accord de phase (QPM) dont la fréquence centrale  $\Omega_p$  et le gain  $G_p$  après une distance de propagation  $L$  peuvent être analytiquement prédites par les formules suivantes [1, 2] :

$$\Omega_p = \pm \sqrt{\frac{2\pi p / \Lambda - 2\gamma P}{\beta_{2av}}} \quad \text{et} \quad G_p = \exp \left[ 2\gamma P L \left| J_p \left( \frac{\beta_{2amp} \Omega_p^2}{2\pi / \Lambda} \right) \right| \right] \quad (1)$$

où  $p = 1, 2, 3, \dots$  est l'ordre de la bande QPM, et  $J_p$  est la fonction de Bessel d'ordre  $p$ .

### 3. INFLUENCE DE L'AMPLITUDE DE LA DISPERSION

Nous avons étudié de  $\beta_{2amp}$  sur le spectre enregistré après 12 périodes spatiales. Les résultats sont résumés dans la Fig. 1a où nous voyons que la structure du spectre de sortie varie significativement avec l'amplitude des fluctuations.

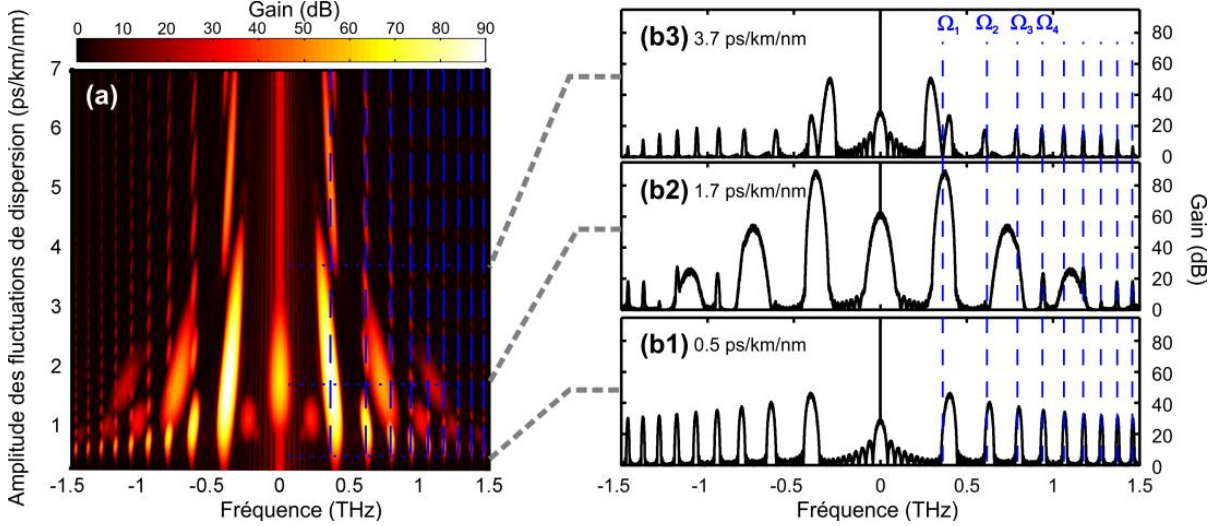


Fig. 1. (a) Évolution du spectre de sortie en fonction de l'amplitude des fluctuations de la dispersion. (b) Détails des spectres pour  $\beta_{2amp} = 0.5$  ps/km/nm, 1.7 ps/km/nm and 3.7 ps/km/nm. Les lignes verticales pointillées représentent les prédictions issues de l'Eq. (1).

Pour  $\beta_{2amp} = 0.5$  ps/km/nm (Fig. 1b1), nous observons un ensemble de bandes étroites irrégulièrement espacées dont les positions sont en accord avec les prédictions de l'Eq. (1) (voir les lignes verticales pointillées). Pour une valeur de  $\beta_{2amp}$  égale à 1.7 ps/km/nm (Fig. 1b2), nous remarquons tout d'abord que certaines bandes spectrales (par exemple celles correspondant à  $p = 2$  ou  $p = 5$ ) ont disparu, toujours en accord avec l'Eq. 1 [1]. Au contraire, d'autres bandes, plus larges et régulièrement espacées cette fois, sont apparues. Elles correspondent au mélange à quatre ondes se développant entre la pompe et la première bande QPM, ce processus pouvant ensuite se cascader, comme démontré expérimentalement dans [3].

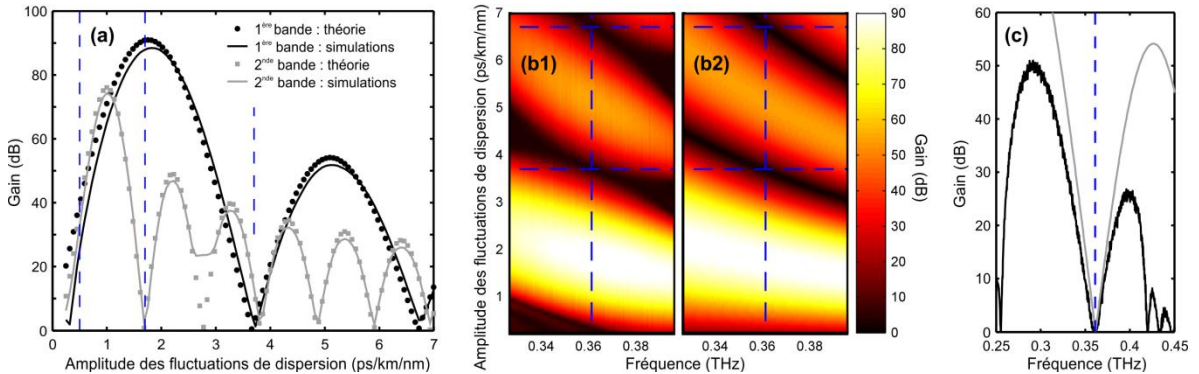


Fig. 2. (a) Évolution du gain d'IM à la longueur d'onde prédite par l'Eq. (1) pour la première et la seconde bande QPM. (b) Agrandissement de la région spectrale autour de  $\Omega_1$  en fonction de l'amplitude des fluctuations de dispersion. Les résultats numériques (b1) sont comparés aux résultats analytiques (b2) prédits par l'Eq. (2). Les lignes verticales indiquent la fréquence  $\Omega_1$ . (c) Spectre de sortie obtenu pour  $\beta_{2amp} = 3.7$  ps/km/nm à partir des simulations numériques (ligne noire) et de l'Eq. 2 (ligne grise).

Pour une amplitude d'oscillation de la dispersion encore plus forte, 3.7 ps/km/nm (Fig. 1b3), au lieu d'une seule bande de gain, nous avons l'émergence d'une paire de bandes situées de part et d'autre de la fréquence  $\Omega_l$ . Comme notre modèle est scalaire et ne prend pas en compte d'effets d'ordres supérieurs, ces nouvelles bandes ne peuvent pas être reliées à l'IM induite par le 4<sup>ème</sup> ordre de dispersion ou bien par un processus non-linéaire vectoriel. Nous avons également vérifié que ces nouvelles bandes ne peuvent pas être expliquées par un mélange non-linéaire entre d'autres bandes.

Nous avons alors étudié plus précisément l'évolution du gain subi aux fréquences prédites par l'Eq. (1). Les résultats sont résumés sur la Fig. 2a et attestent pour  $\Omega_l$  et  $\Omega_2$  d'un très bon accord entre prédictions analytiques et simulations numériques. La conclusion la plus importante est ici que l'observation des deux bandes au voisinage de  $\Omega_l$  dans la Fig. 1b3 ne vient pas en contradiction des prédictions de l'Eq. (1).

Pour mieux cerner l'origine de ces deux sous-bandes, nous avons représenté un agrandissement de la première bande QPM obtenue par simulations numériques (Fig. 2b1), que nous avons comparé avec l'expression analytique suivante (Fig. 2b2), qui représente une extension de l'Eq. 1, initialement prévue pour décrire le gain à la fréquence  $\Omega_l$  uniquement :

$$G(\omega) = \exp \left[ 2\gamma P L \left| J_1 \left( \frac{\beta_{2amp} \omega^2}{2\pi / \Lambda} \right) \right| \right] \quad (2)$$

Nous constatons sur la Fig. 2b2, que l'Eq. 2 fournit une piste intéressante pour expliquer l'émergence des deux sous-bandes. Bien que l'utilisation de l'Eq. 2 ne soit pas strictement rigoureuse, cette équation reproduit néanmoins qualitativement la structure observée. Cela se confirme sur la Fig. 2c où l'Eq. 2 est en mesure de reproduire la pente intérieure des deux bandes.

## CONCLUSION

Dans une DOF avec une large amplitude de fluctuations, la bande de gain d'instabilité modulationnelle peut se scinder en deux sous-bandes. L'existence de ces deux branches ne viole pas les lois analytiques existantes, le lien se trouvant pour les paramètres où le gain d'IM s'annule pour la fréquence centrale de résonance. Les deux sous bandes qui émergent au voisinage de la bande centrale QPM peuvent être qualitativement reproduites en étendant le gain résonant prédit à des fréquences discrètes par une expression impliquant des fréquences continues.

Nous expliquerons également comment une analyse linéaire de stabilité exploitant le formalisme de Floquet permet une explication quantitative de ce phénomène. L'impact de pertes ou d'un gain distribué sera aussi discuté [4].

Nous montrerons enfin que le phénomène observé n'est pas restreint à la seule fibre utilisée et qu'une signature similaire existe également dans la fibre utilisée dans [3]. Nous détaillerons ainsi des résultats expérimentaux obtenus aux longueurs d'ondes des télécommunications optiques.

## RÉFÉRENCES

- [1] M. Droques, A. Kudlinski, G. Bouwmans, G. Martinelli, and A. Mussot, "Dynamics of the modulation instability spectrum in optical fibers with oscillating dispersion," *Phys. Rev. A* **87**, 013813 (2013).
- [2] N. J. Smith and N. J. Doran, "Modulational instabilities in fibers with periodic dispersion management," *Opt. Lett.* **21**, 570 (1996).
- [3] C. Finot, J. Fatome, A. Sysoliatin, A. Kosolapov, and S. Wabnitz, "Competing four-wave mixing processes in dispersion oscillating telecom fiber," *Opt. Lett.* **38**, 5361-5364 (2013).
- [4] C. Finot, F. Feng, Y. Chembo, S. Wabnitz, "Gain sideband splitting in dispersion oscillating fibers," *Opt. Fiber Technol.*, in press (2014). <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00981213>